

# ОПТИКА:

від видимого

до невидимого  
*до невидимого*

Кафедра прикладної фізики ФТІ НТУУ “КПІ”

*Доц. Іванова В.В.*

# Шкала електромагнітних хвиль

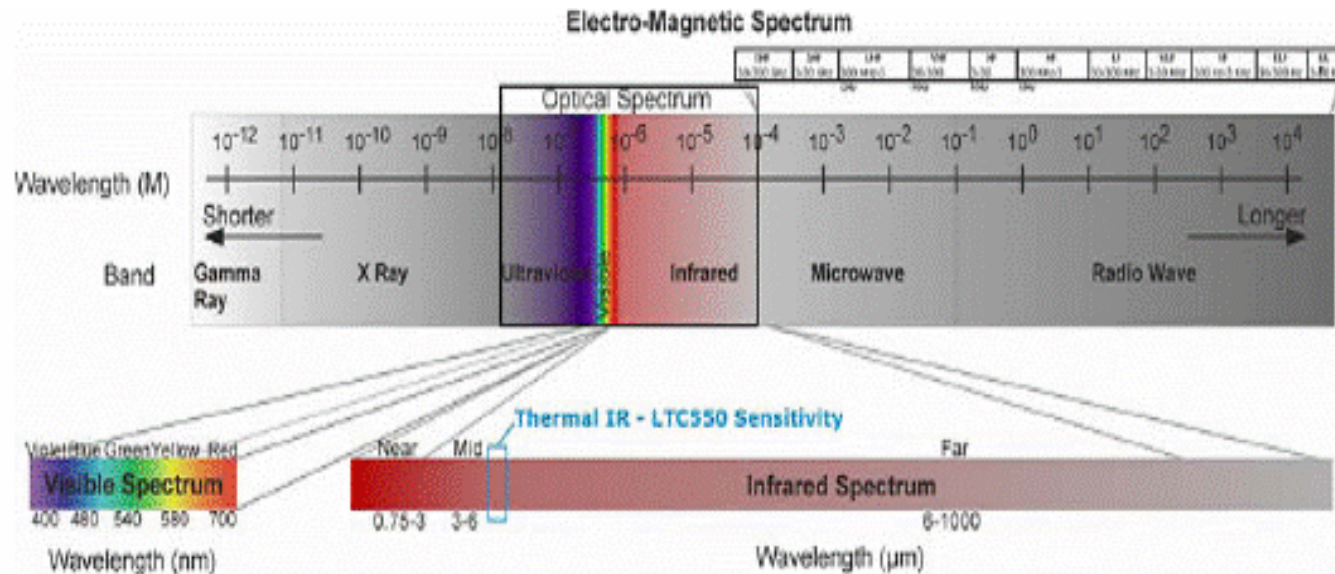


FIGURE A3 IR ON THE ELECTRO-MAGNETIC SPECTRUM

- Оптичний діапазон  $\sim 10^{17} - 10^{12}$  Гц
- Видиме світло  $\sim 10^{15} - 0,5 \cdot 10^{14}$  Гц (0,38 – 0,78 мкм)

# Етапи історії розвитку оптики

I етап : вивчення видимого оком світла

- Геометрична оптика

Платон,  
Птолемей,  
Евклід

*“Світло – промені, які виходять з очей, розповсюджуються по прямому шляху”*

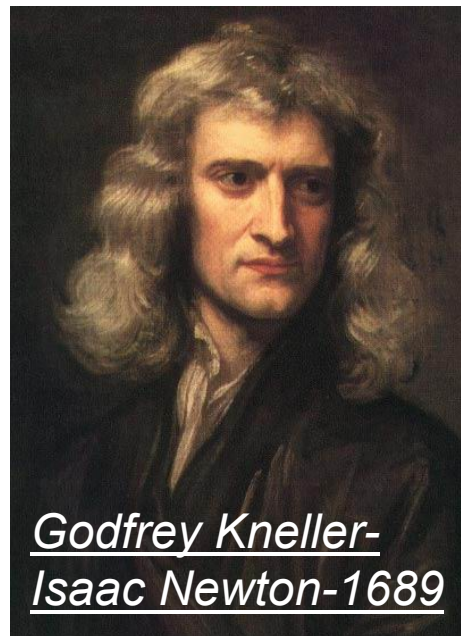


Арістотель

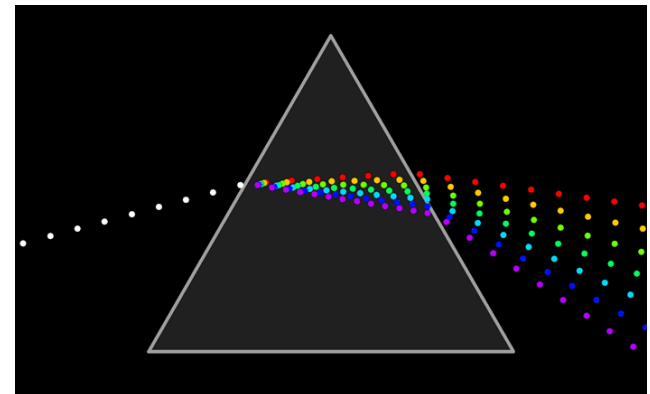
*“Світло – дія, рух, який розповсюджується в просторі”*

Ломоносов, Ейлер

- Корпускулярна теорія
- Ньютон, Декарт (?)



Godfrey Kneller-  
Isaac Newton-1689



## ■ Хвильова теорія

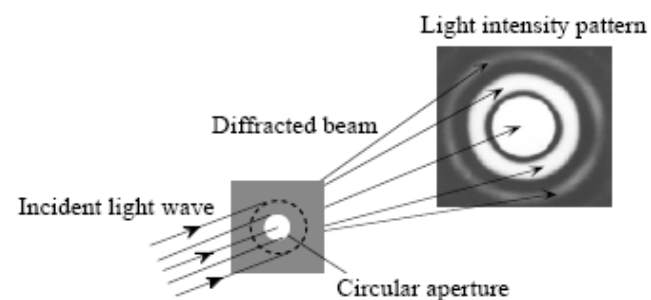
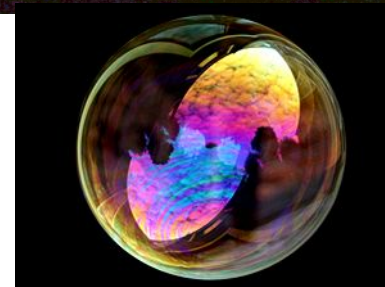
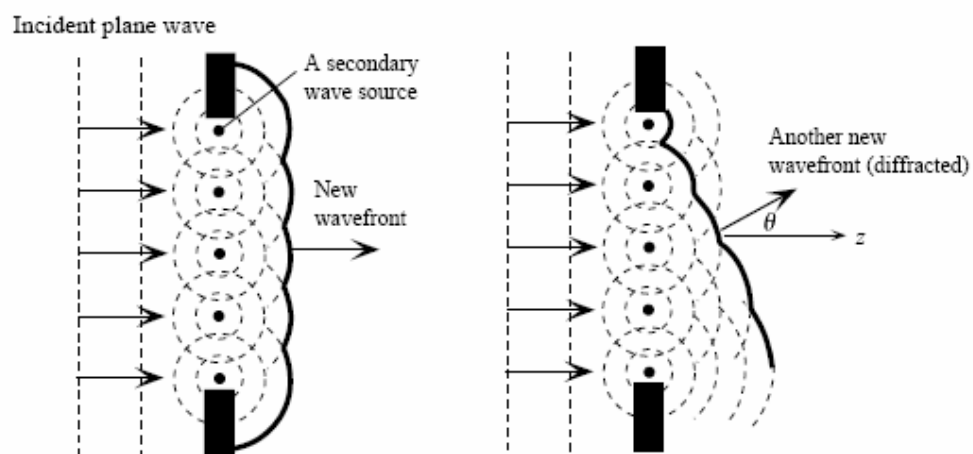
■ Грімальді

■ Гюйгенс

■ Юнг

■ Френель

■ Фраунгофер

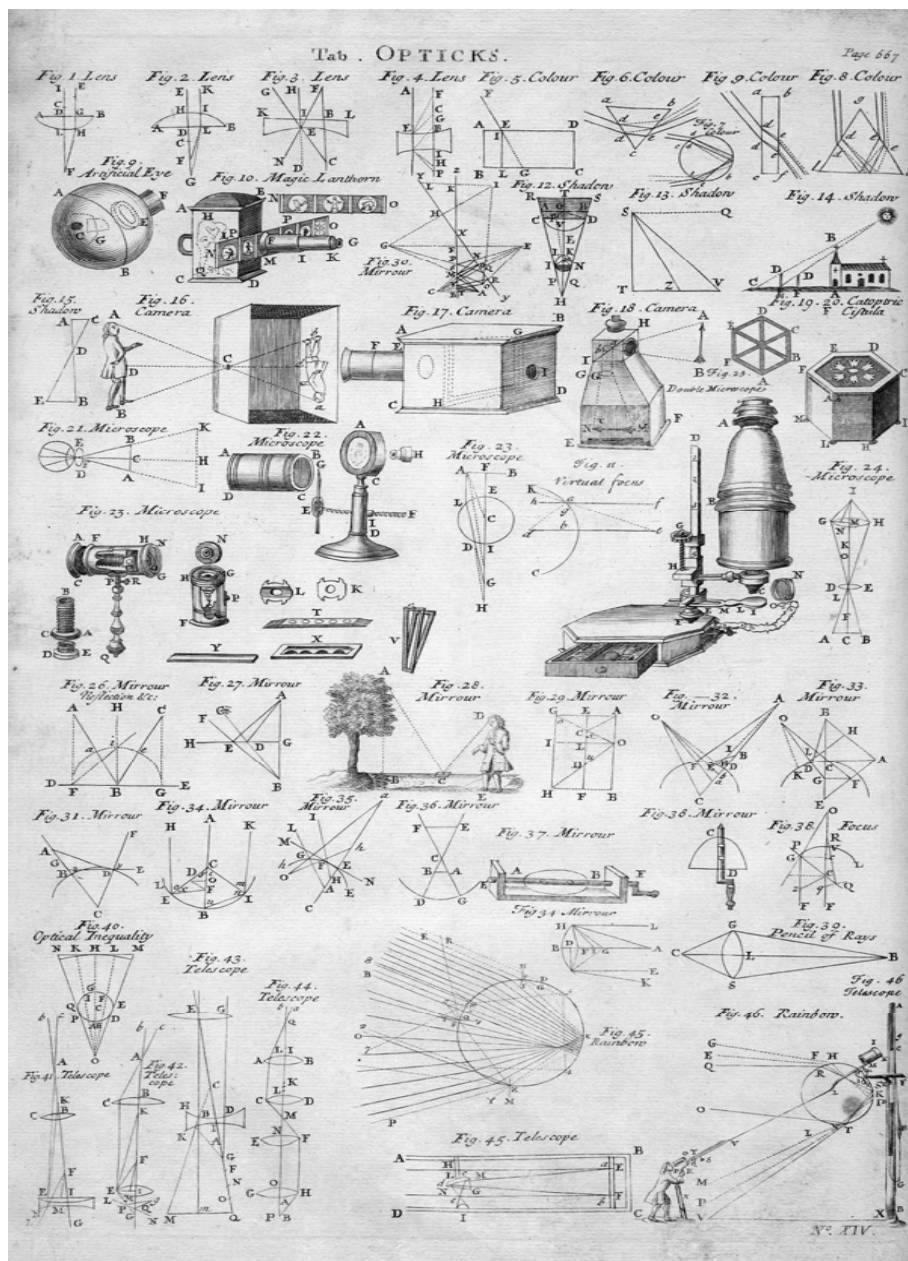


*Принцип Гюйгенса-Френеля*



# ОПТИКА XVII – XVIII ст.

Таблиця з  
енциклопедії  
1728 року



# Етапи історії розвитку оптики

- Електромагнітна теорія - вершина I “класичного” етапу розвитку оптики
- Д.К. Максвелл (1864, рівняння електродинаміки)

Револьюційні відкриття в фізиці на початку XX ст.

- У. Сміт, О.Г. Столетов (1873, 1888 – відкриття фотоефекту)
- М. Планк (1900, дослідження спектру випромінювання чорного тіла, ввів поняття кванта дії)
- А. Ейнштейн (1905, гіпотеза про квантову природу світла; 1917, умови вимушеного випромінювання)
- В.О. Фабрикант (1940, принцип квантового підсилення)
- Д. Габор (1947, відкриття голографії)
- О.М. Прохоров, М.Г. Басов, Ч. Таунс (1954, відкриття LASER)

## II “сучасний” етап розвитку оптики

**Фотоніка** займається процесами генерації, пропускання, детектування, контролю випромінювання

# Перетворення сонячної енергії



Honda's two seated Dream car is powered by photovoltaics. The Honda Dream was first to finish 3,010 km in four days in the 1996 World Solar Challenge. (Courtesy of Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales, Sydney, Australia)

# Шкала електромагнітних хвиль

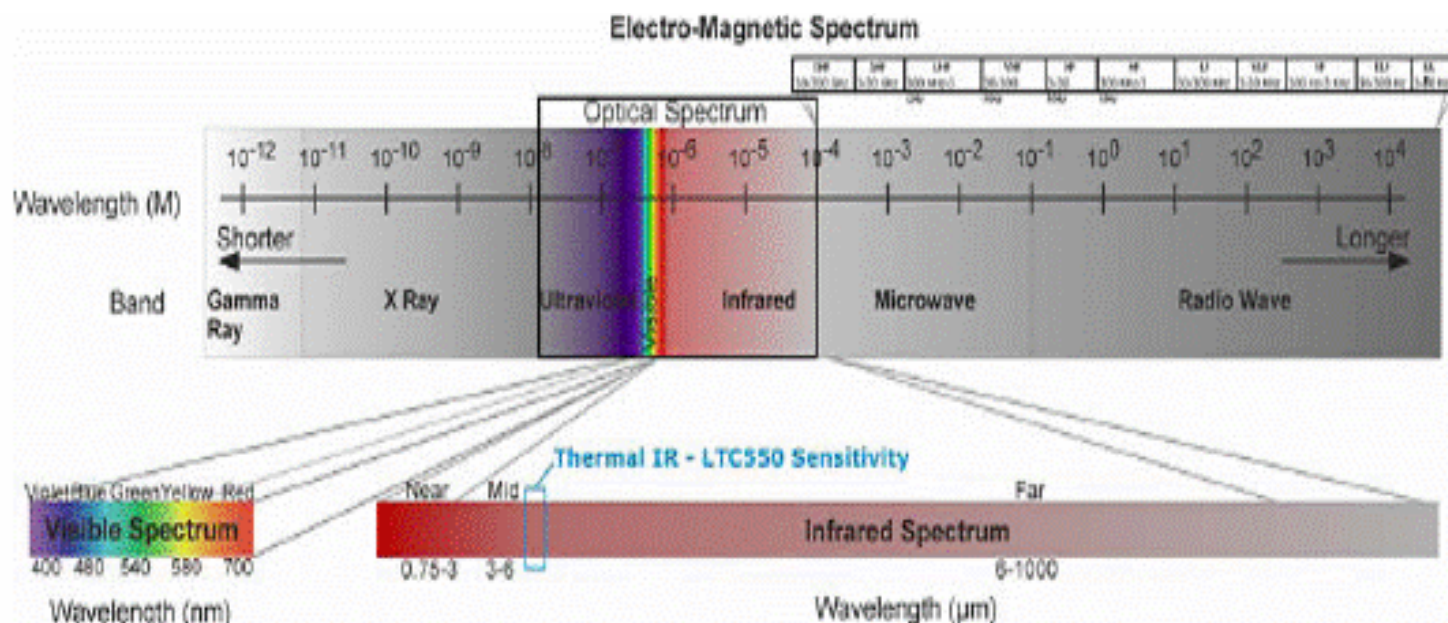


FIGURE A3 IR ON THE ELECTRO-MAGNETIC SPECTRUM

- *Оптичний діапазон*  $\sim 10^{17} - 10^{11}$  ( $10^{12}$ ) Гц
- *Видиме світло*  $\sim 10^{15} - 0,5 \cdot 10^{14}$  Гц (0,38 – 0,78 мкм)
- *ІЧ випромінювання*  $\sim 10^{14} - 10^{12}$  ( $10^{11}$ ) Гц
- *Т-випромінювання (ТГц діапазон)*  $\sim 0,1 - 10$  ТГц



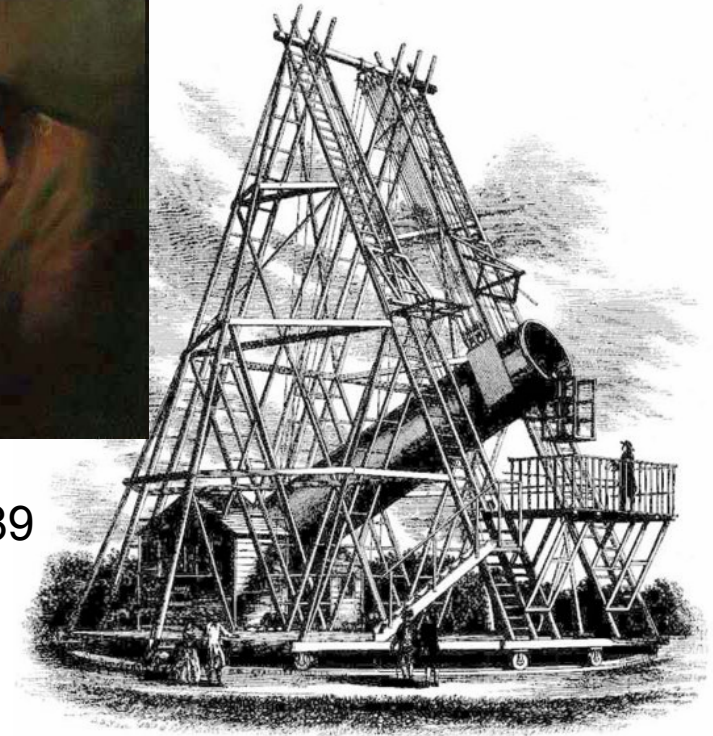
# Закони теплового випромінювання

## Відкриття ІЧ випромінювання

- **Infrared** (IR) is radiation with wavelengths that are longer than 700 nm but shorter than 1 mm.
- Infrared radiation was discovered by *William Herschel* (1738 - 1822) in 1800 in the **spectrum** of the Sun.
- ordinary **glass** absorb infrared wavelengths greater than  $\sim 2 \mu\text{m}$ .



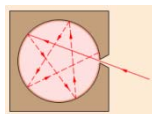
1789



# Закони теплового випромінювання

## Закон Планка

Спектр випромінювання АЧТ



$$\rho(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$$

В тепlobаченні використовують закон Планка у вигляді

*Спектральна густина світності*

$$r_{\lambda}(T) = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{\hbar c}{\lambda kT}) - 1}, [Вт / м^2 мкм]$$



Max Karl Ernst Ludwig Planck; 23 квітня 1858, Кіль — 4 жовтня 1947, Геттінген

*«Научная истина торжествует по мере того, как вымирают её противники» М.Планк*

# Закони теплового випромінювання

## ■ Закон Віна

$$\lambda T \ll hc/k$$

$$r_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right)$$

## ■ Закон Релея-Джинса

$$\lambda T \gg hc/k$$

$$r_\lambda = 2\pi c \frac{kT}{\lambda^4}$$

## • Закон зміщення Віна

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}, \text{ мкм}$$



Сонце:  $T=6000\text{K}$   $\Rightarrow$   $\lambda_{\max}=0,5 \text{ мкм}$

$T=290\text{K}$   $\Rightarrow$   $\lambda_{\max}=10 \text{ мкм}$

$T=77\text{K}$   $\Rightarrow$   $\lambda_{\max}=38 \text{ мкм}$

# Закони теплового випромінювання

## ■ Закон Стефана – Больцмана

$$M_{\lambda} = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}, \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}^4$$



Приклад:

*Інтегральна поверхнева густина потоку  
випромінювання тіла при  $T=300\text{K}$*

$$M=0,05 \text{ Вт/см}^2$$

*Якщо площа шкіряного покриву  $\sim 2\text{м}^2$*

$$P = 1\text{кВт}$$



# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

- Пропускання ІЧ випромінювання атмосферою

- Вікна прозорості атмосфери:

0,4 - 1,1; 1,2 - 1,3; 2,1 - 2,5;

3,5 – 5 ; 8 – 14 мкм

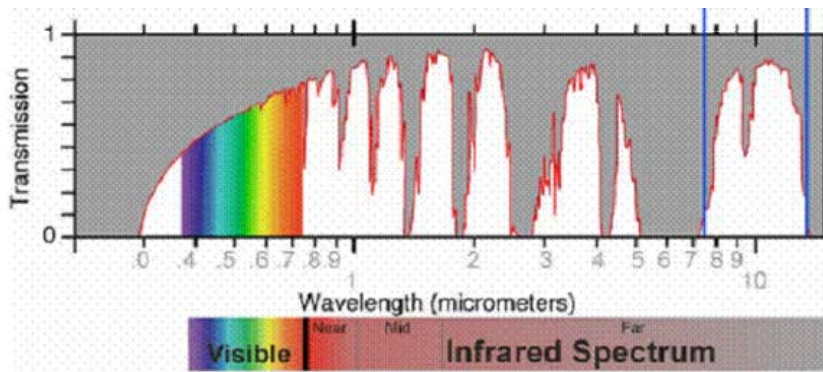
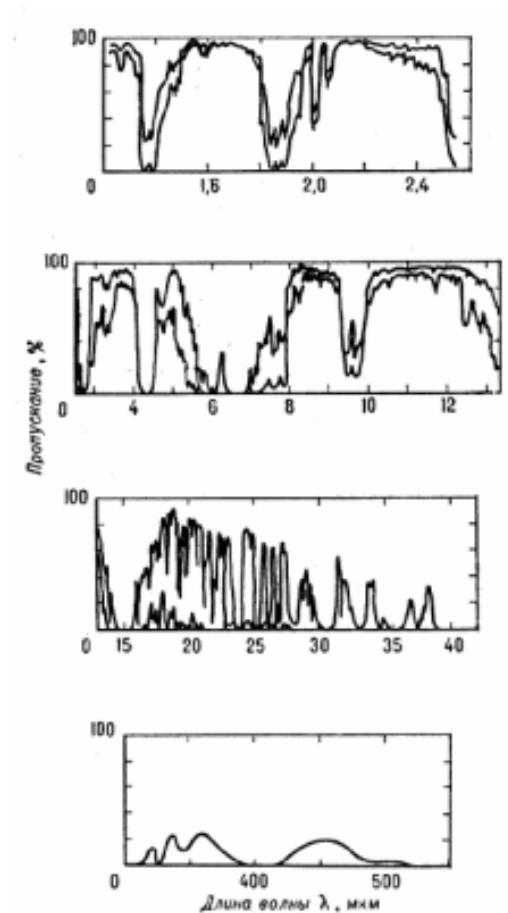


FIGURE A8 ATMOSPHERIC TRANSMITTANCE



Пропускання атмосфери на  
рівні моря і на висоті 4 км



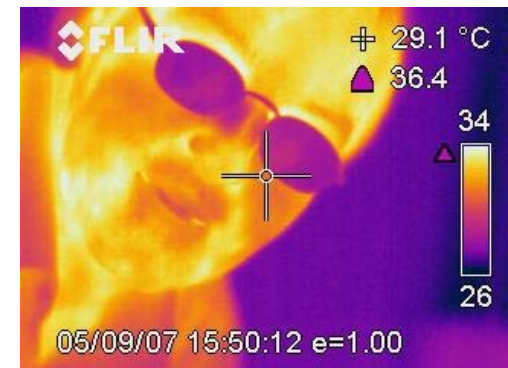
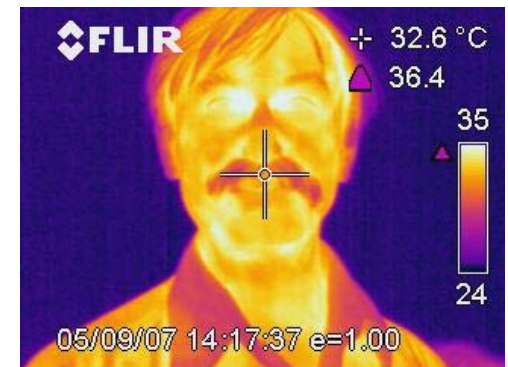
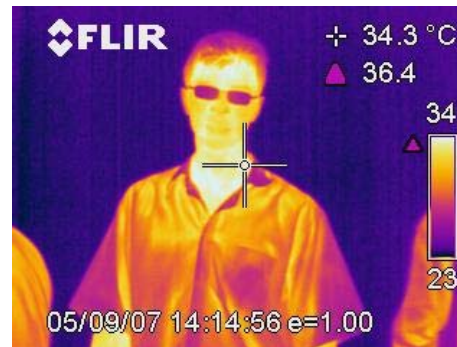
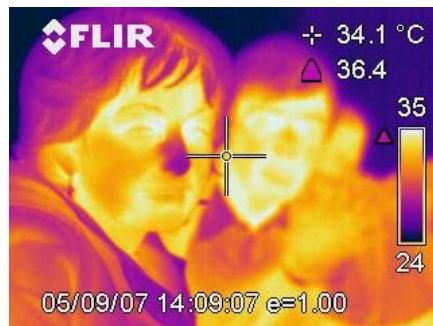
# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

- **Теплобачення** – *перетворення ІЧ випромінювання теплоконтрастних об'єктів в аналог видимого зображення*
- **Термографія** – *вимірювання температурних полів*

### Застосування тепловізійних систем

- Медицина
- Інфрачервона астрономія
- Промисловість (дефектоскопія, контроль техпроцесів...)
- Аерофотозйомка місцевості
- Системи охорони і безпеки
- Військові техніка (ПНВ)
- Будівництво
- Енергетика



# Як побачити невидиме? Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

## ■ Медицина

Тепловизор NEC TH9100SL для  
медицини

Діапазон вимірювань  
 $-20^{\circ}\text{C} - +100^{\circ}\text{C}^*$ .

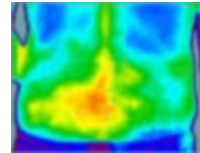
Мінімально розличувана різниця  
температур  
 $0.06^{\circ}\text{C}$  при  $30^{\circ}\text{C}$ .

Точність вимірювань  
 $\pm 1^{\circ}\text{C}$  или  $\pm 1\%$  от текущего показания  
температуры

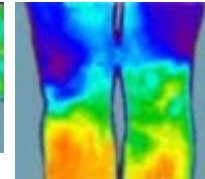
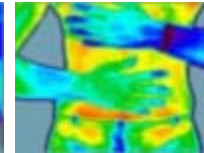
Спектральний діапазон  
 $8 - 14 \text{ мкм}$ .

Детектор

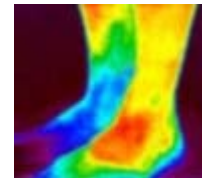
Матричного типу, без охолодження,  
установлюється в фокальній  
площині об'єктива  
(микроболометр),  $320 \times 240$  елементів.



Міжхребцева грижа



Артроз коліна



Подагра лівої  
стопи



# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

### ■ Будівництво (контроль витоку тепла)



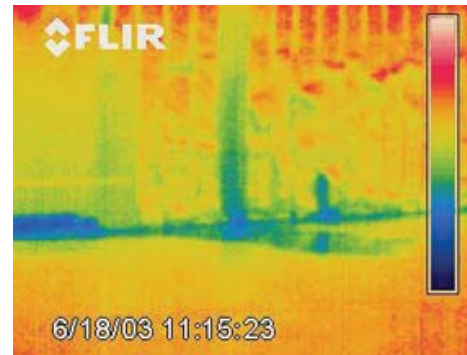
Вікна з одинарним і подвійним заскленням



### Ремонтні роботи (контроль вологості)



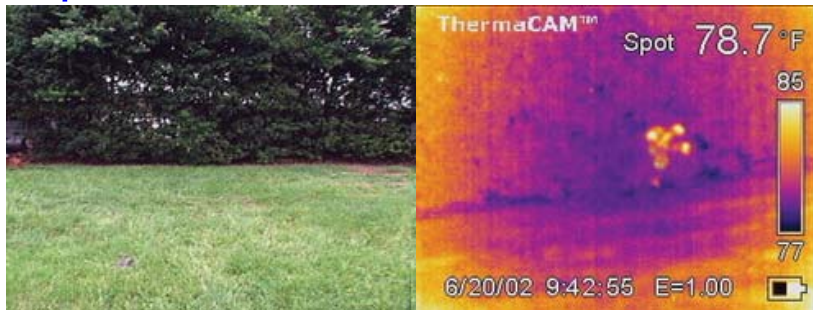
Мокра стіна після гасіння пожежі через 11 годин



# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

### ■ Охорона і безпека



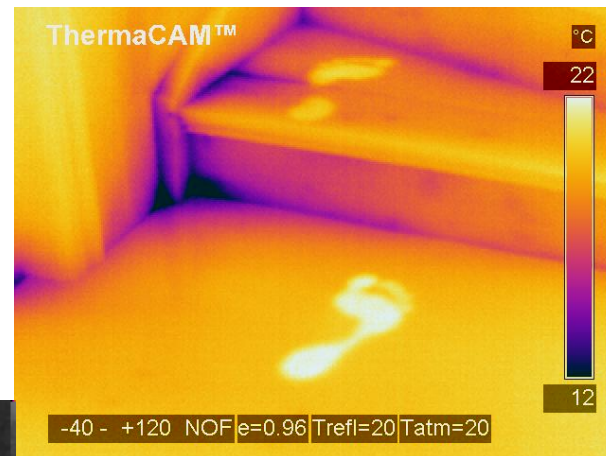
Підозрілий за деревами



Підозрілий на даху



### ■ Охорона і безпека



Компания FLIR Systems является одним из пионеров и признанным мировым лидером в разработке и производстве тепловизионной техники. Компания прошла длительный путь развития и, по существу, ведет свою историю от шведской фирмы AGEMA Infrared Systems (основана в 1958 ).

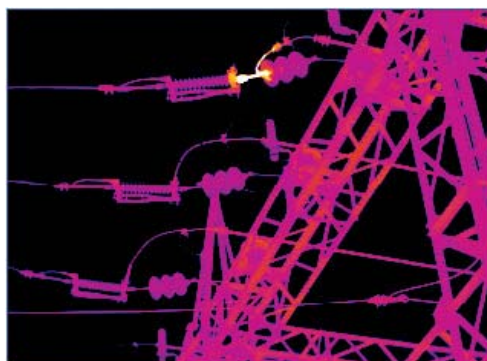
#### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗОРА

- Развертываемые службы охраны
- Защита границы
- Защита ценного имущества
- Промышленная безопасность
- Охрана по периметру
- Защита частей вооруженных сил



# Як побачити невидиме? Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

## ■ Енергетика



На этом ИК-изображении показано «горячее» соединение (измеренная с использованием телескопического объектива температура соединения составляет 225°C) в подстанции, которая подаёт электропитание в больницу и близлежащие к ней здания. При помощи тепловизора удалось сразу же зафиксировать наличие дефекта. Электрическое соединение было повреждено при грозе, в результате чего контакт приварился заново к опорному кронштейну изолятора.

## Енергообладнання

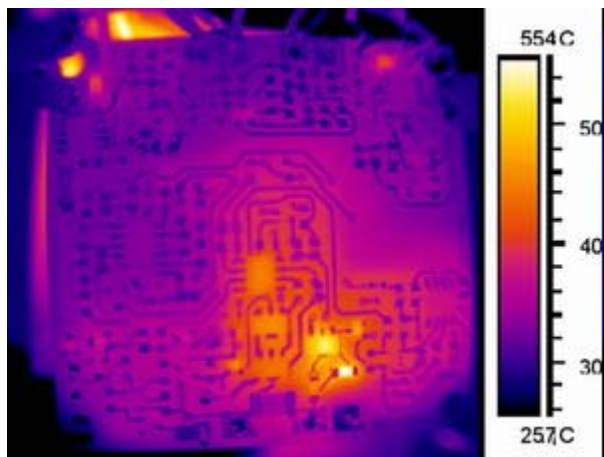
Перегрів  
запобіжника



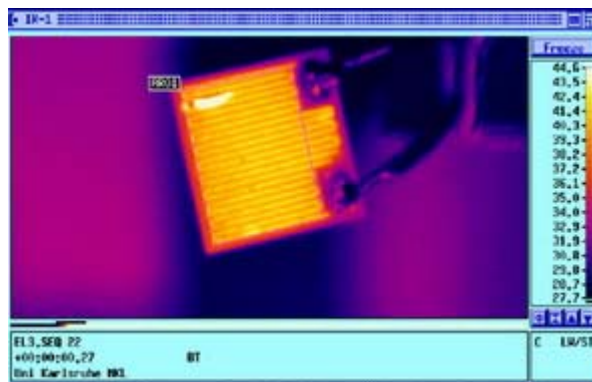


# Як побачити невидиме? Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

## Електроніка



Перегрівання плат



Мікрорезистор

# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

### ■ Космічні дослідження

Южный полюс Марса со станции Mars Odyssey 2001 с разрешением около 5 километров на пиксель и протяженностью 6500 километров.

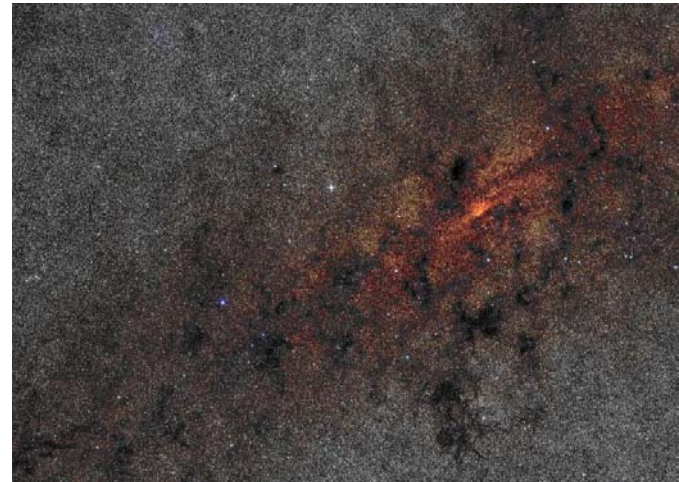
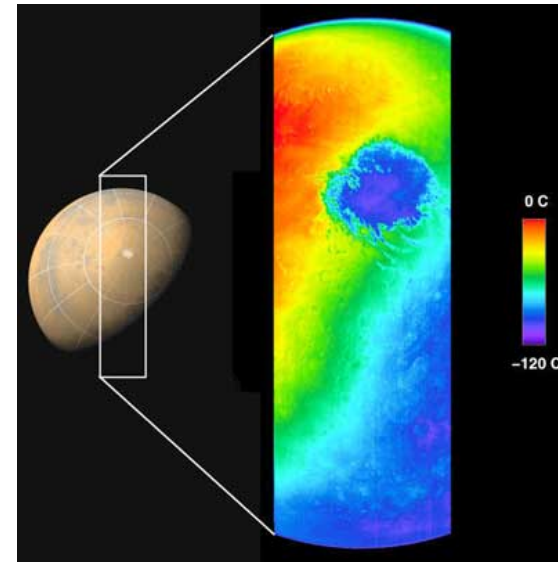
### ■ ІЧ астрономія

Вулкан Мауна-Кеа (Гавайські острови) 4200 м ІЧ-телескопи: франко-канад с діаметром дзеркала  $D= 375$  см, англ. ( $D= 360$  см) США - НАСА ( $D= 300$  см , 224-см телескоп Гавайського ун-та.

Приймачі ІЧ телескопів:

фотоемульсії- - ФЕП –  
фоторезистори -- болометри

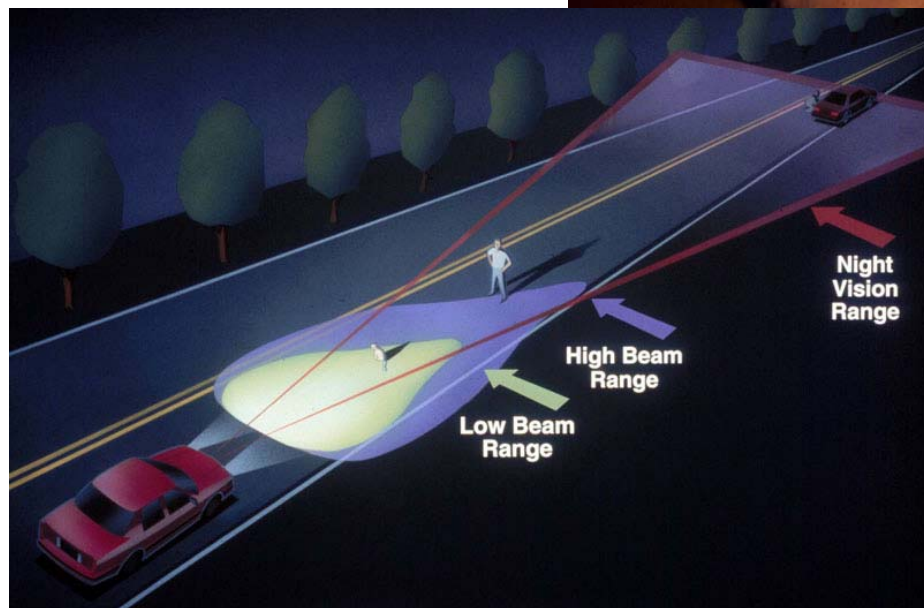
telescope was equipped with a [camera](#) that housed 3 near-infrared arrays, so that the sky was surveyed simultaneously at J( $1.25\ \mu\text{m}$ ), H ( $1.65\ \mu\text{m}$ ) and Ks ( $2.16\ \mu\text{m}$ ). The pixel size for the survey was 2.0



Массачусетський ун-т

# Як побачити невидиме? Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

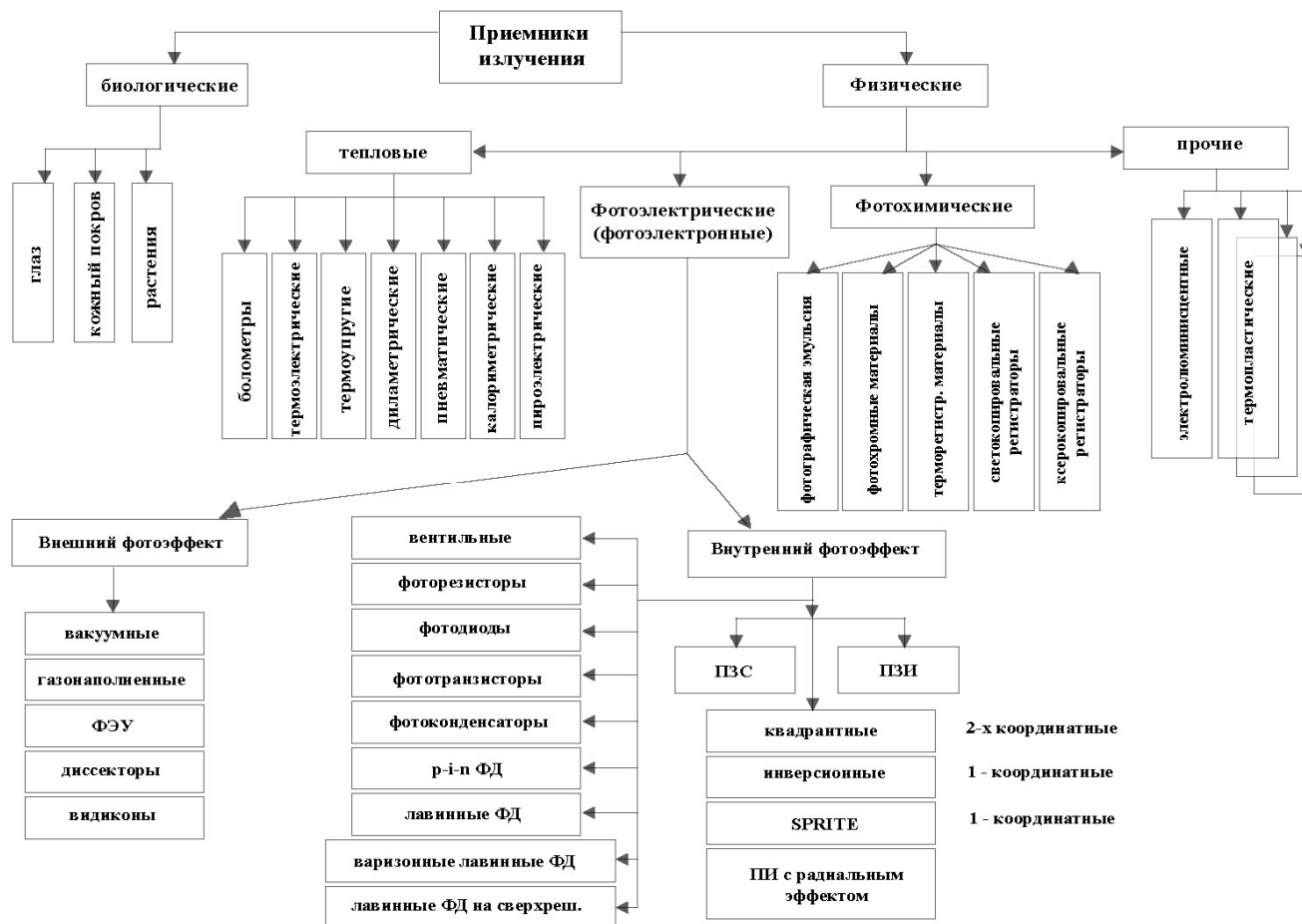
- **Безпека на  
дорогах**



# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ

- Фотонні приймачі випромінювання
- Теплові приймачі випромінювання



# Як побачити невидиме?

## Допоможе ТЕПЛОБАЧЕННЯ





# Як побачити невидиме?

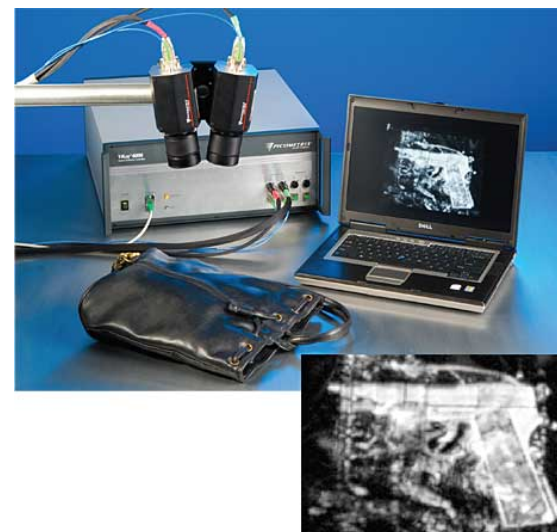
## Допоможуть Т-промені (T-Rays)

- $\sim 0,1 - 10$  ТГц —  
**ексклюзивний діапазон**
- Прозорість для ТГц багатьох матеріалів (папір, текстиль, дерево, кераміка, н/п,...)
- Високий ступінь поглинання водою
- Відбивання металами

Проект ESA *Вперше у 2002 р.*

### StarTiger ТГц камери

TeraView, in Cambridge, England, and ThruVision, in Abingdon, England, both of British national labs, as well as companies like Spire Corp., in Bedford, Mass., and Advanced Energy Systems, in Princeton.



# Як побачити невидиме?

## Допоможуть Т-промені (T-Rays)

- ТГц системи виявлення наркотиків:
- Наявність специфічних вузьких смуг поглинання хімічних речовин
- Прозорість більшості матеріалів упаковки
- Безпечність

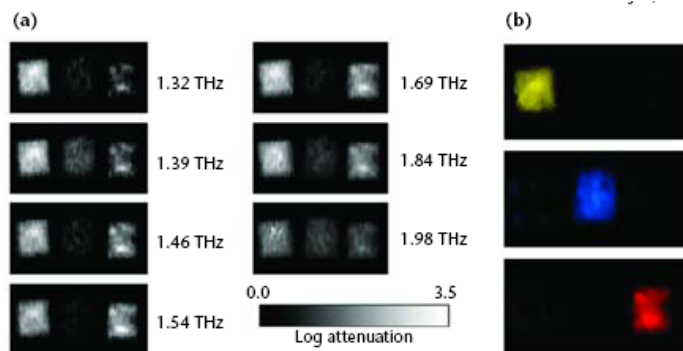


Figure 2. (a) Multispectral image of the target, recorded at seven frequencies between 1.32 and 1.98 THz. (b) Spatial patterns of MDMA (yellow), aspirin (blue) and methamphetamine (red) extracted from the multispectral image by use of fingerprint spectra.

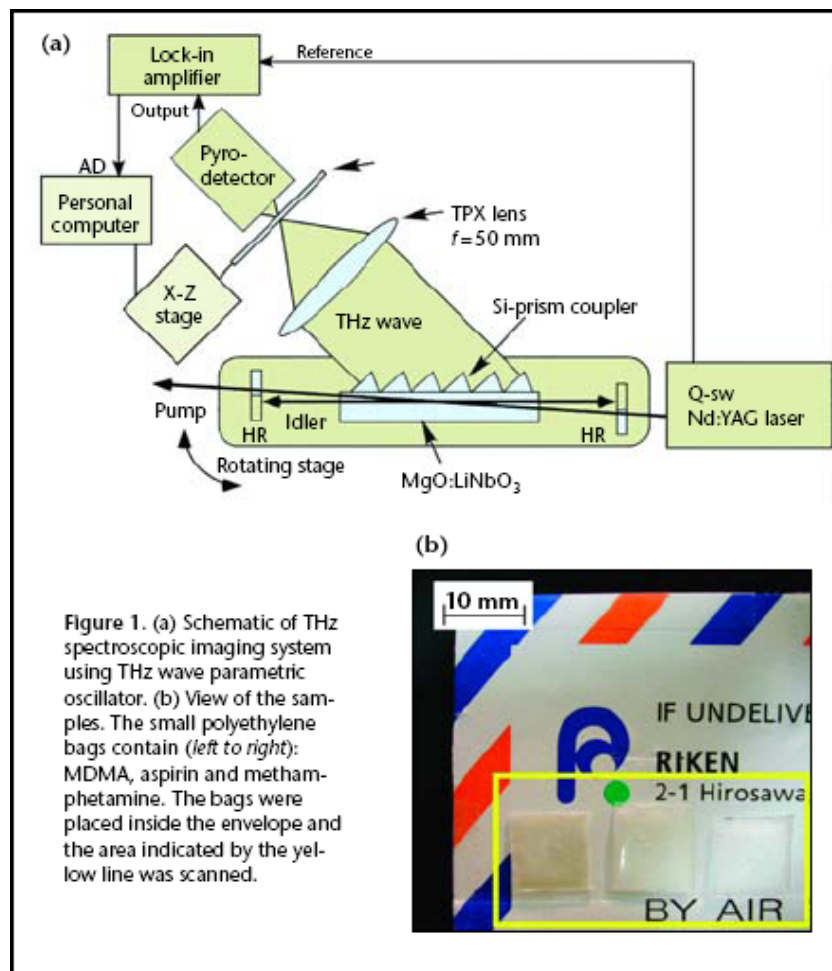


Figure 1. (a) Schematic of THz spectroscopic imaging system using THz wave parametric oscillator. (b) View of the samples. The small polyethylene bags contain (left to right): MDMA, aspirin and methamphetamine. The bags were placed inside the envelope and the area indicated by the yellow line was scanned.

Kodo Kawase (kodo@riken.jp) leads the Kawase Initiative Research Unit at RIKEN, Wako, Japan. He is also professor of the THz Bio-engineering Laboratory at Tohoku University, Sendai, Japan.



# Як побачити невидиме?

## Допоможуть Т-промені (T-Rays)



- Ще одне застосування – читання древніх манускриптів

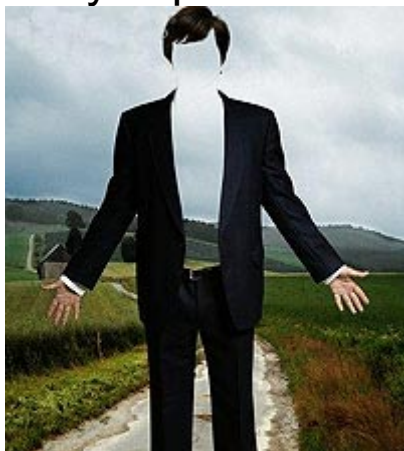
Ун-т Лідса з Великої Британії

Приймач випромінювання – болометр – на гарячих носіях

# Як сховати видиме?

## ■ “Людина – невидимка”

Може бути реальністю?

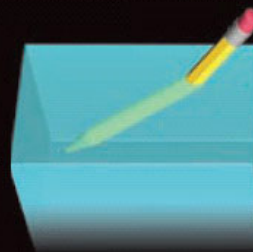


## СТРАННОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В среде с отрицательным показателем преломления свет (и все другие виды электромагнитного излучения) ведет себя не так, как в обычных материалах с положительным преломлением, причем во многих отношениях это поведение противоречит интуиции

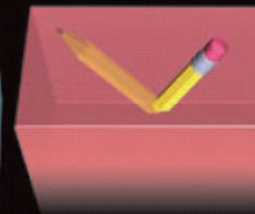
**СРЕДА  
С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ  
ПОКАЗАТЕЛЕМ  
ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Карандаш в воде кажется изогнутым из-за более высокого показателя преломления воды

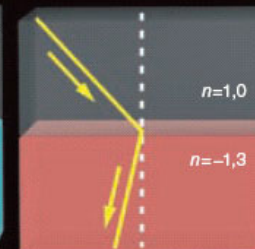
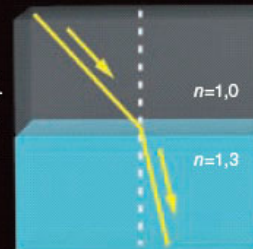


**СРЕДА  
С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ  
ПОКАЗАТЕЛЕМ  
ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Карандаш, погруженный в среду с отрицательным преломлением, будет казаться изогнутым наружу



Когда свет переходит из среды с низким показателем преломления ( $n$ ) в среду с более высоким, он отклоняется в сторону нормали (пунктирная линия под прямым углом к поверхности раздела)



Когда свет идет из среды с положительным преломлением в среду с отрицательным, он отклоняется назад, оставаясь по ту же сторону нормали, что и падающий свет



Удаляющийся объект кажется более синим

кажется фек-

Теоретически можно создать плазмонные материалы, которые могли бы делать объекты невидимыми. Преломляясь в толстой оболочке из метаматериала с необычными оптическими свойствами, электромагнитное излучение могло бы огибать расположенный внутри нее космический корабль. В результате направленный на него телескоп увидел бы лишь свет далекой галактики

Оболочка из метаматериала

ПЛАЩ-НЕВИДИМКА

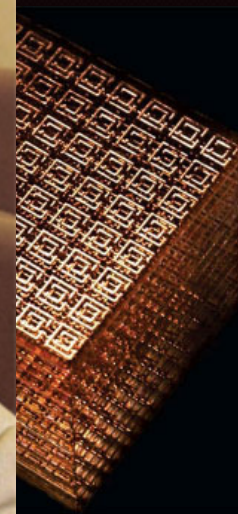
Полость

Космический телескоп

Свет далекой галактики

Космический корабль

Copyright © В МИРЕ НАУКИ





Як сховати видиме?

ПРО ЦЕ МИ ПОГОВОРИМО  
НАСТУПНОГО РАЗУ

Дякую за увагу!